

REHABILITACIÓN DE IGLESIAS DAÑADAS EN MÉXICO. DOS CASOS DE ESTUDIO

M. Jara-Díaz¹, J. M. Jara-Guerrero¹, J. A. Aguilar-Carboney², y H. Varum³

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Facultad de Ingeniería Civil

Ciudad Universitaria, Avenida Francisco Mújica s/n, Morelia, Michoacán, Mexico
Tel.: +052 443 316-72-05; E-mail: mjara@umich.mx; jmjara@umich.mx;

² Universidad Autónoma de Chiapas
Facultad de Ingeniería Civil

Boulevard Belisario Domínguez km 1081, Colina Universitaria CP 29020,
Tuxtla Gutiérrez Chiapas, Mexico

Tel.: +052 961 617-80-00; E-mail: jaguilar@unach.mx

³ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Aveiro
Campus Universitário de Santiago

3810-193 Aveiro, Portugal; E-mail: hvarum@civil.ua.pt

Palabras clave: agrietamiento, tensores, refuerzo de cimentación

Resumen:

En México existe una gran cantidad de iglesias que fueron construidas durante los siglos XVI a XIX. Muchas de ellas han sufrido deterioro con el paso del tiempo, lo que ha dado origen a agrietamientos, corrosión y otros daños en los elementos de la estructura. En otros casos, la actividad sísmica ha causado daños menores que se han acumulado a lo largo del tiempo y que han terminado por afectar la resistencia y rigidez de la estructura. El abatimiento de aguas freáticas ha provocado asentamientos diferenciales en algunas iglesias, con el consecuente daño provocado en los materiales con los que están construidas.

En este trabajo se presentan dos casos de rehabilitación de iglesias que han sufrido daños por las causas mencionadas anteriormente. La primera, es una construcción del siglo XVI, ubicada en el estado de Chiapas. Los daños existentes se atribuyen a la falta de mantenimiento y a los pequeños agrietamientos sucesivos que se han ido produciendo por eventos sísmicos ocurridos a lo largo del tiempo. Para recuperar la capacidad de carga de la estructura se realizaron diferentes tipos de intervención que incluyen la adición de tensores para restringir el desplazamiento de las columnas existentes y de los apoyos de las bóvedas interiores, así como la reparación de arcos y bóvedas. El segundo caso representa otro problema encontrado con cierta frecuencia en este tipo de construcciones. Se trata de una iglesia más reciente, que tiene diversos agrietamientos en bóvedas, muros y torre, provocados por asentamientos diferenciales. Las causas del asentamiento se atribuyen al abatimiento del nivel de aguas freáticas, a las variaciones abruptas del nivel del terreno firme, a las importantes descargas transmitidas al terreno de cimentación y a la distribución asimétrica de los esfuerzos sobre el terreno.

1. Introducción

La gran cantidad de iglesias y conventos construidos en México durante los siglos XVI a XIX, forma parte de la riqueza cultural, artística e histórica del país. Debido a su antigüedad, una gran parte de este tipo de estructuras presenta diferentes niveles de deterioro que llegan a poner en riesgo la estabilidad de elementos individuales de la iglesia, y en algunos casos, de la estructura en su conjunto. Por otro lado, la mayor parte de estas obras se ubica en zonas de alta sismicidad y la estructura

resistente original de las iglesias construidas en estos siglos, no está concebida para enfrentar acciones de tipo sísmico, dando origen a daños de diferentes niveles de gravedad a lo largo de la historia.

De acuerdo con los datos recabados por Alcocer et al, (1999), Jara (1999), Meli, (1998), Meli, (2003) y Jara, (2005), se concluye que los elementos más vulnerables son las partes altas de torres y campanarios, las fachadas y los apéndices. Sin embargo, desde el punto de vista de la gravedad para el sistema estructural, los elementos que más problemas presentan son las cúpulas, bóvedas y fachadas. Las torres y los campanarios son susceptibles de presentar daños particularmente en el caso de sismos. Se han observado contrafuertes exteriores con agrietamiento diagonal, señal de que han sido solicitados durante eventos telúricos.

Aunque algunas iglesias tienen programas de mantenimiento adecuados y han sido intervenidas para mejorar su respuesta sísmica, los daños que aún se observan en muchas iglesias del país, dan una idea de la gravedad de la situación y de la importancia de emprender medidas preventivas para reducir la vulnerabilidad de estos importantes monumentos. A continuación se presentan dos casos de estudio de iglesias con problemas que se presentan con frecuencia en las iglesias existentes en el país.

2. Rehabilitación estructural del conjunto conventual de Santo Domingo en Tecpatán, Chiapas, México

El templo y convento dominico de Tecpatán, construido en el siglo XVI, es un ejemplo del carácter de los misioneros dominicos que llegaron al estado de Chiapas, durante la colonia en México, que frecuentemente reflejaban en sus construcciones una esperanza de desarrollo futuro, más que satisfacer una necesidad inmediata, concretando impresionantes edificaciones (Markman, 1993). El conjunto conventual tiene la estructuración tradicional en este tipo de edificaciones, un templo principal anexo al convento formando una planta rectangular con un patio central.

El conjunto conventual ha recibido varias intervenciones estructurales parciales desde 1974, estas intervenciones fueron enfocadas para la restauración de algunas áreas muy localizadas del edificio, pero nunca se había considerado una restauración integral del conjunto arquitectónico. Actualmente, el grado de



Templo de Santo Domingo en Tecpatán



Tensores con camisa de acero y placa de conexión

deterioro es variable, algunas zonas del templo y del convento están en ruinas.

Se ha iniciado un programa muy ambicioso de intervención del templo y el convento que pretende una restauración integral del conjunto. En una primera etapa se desarrolló el proyecto de restauración de la crujía oriente, en esta zona del edificio las columnas de mampostería del deambulatorio del patio central presentan desplomes evidentes, en especial las columnas centrales. Se reforzó con un sistema de apuntalamiento temporal para la restauración de arcos, bóvedas y la implementación de un sistema de tensores de acero a nivel del entrepiso, colocados en el interior, entre los límites de una bóveda y otra.

Los tensores están encamisados con tubos de acero, se conectan a las columnas y muros de mampostería mediante placas de acero. La función del sistema de tensores es restringir el desplazamiento de las columnas existentes y de los apoyos de las bóvedas interiores, permitiendo una mejor liga estructural entre los arcos interiores y los muros perimetrales. Este procedimiento se ha realizado desde hace muchos siglos (Meli, 2003) y ha demostrado ser muy efectivo para limitar los desplazamientos laterales de muros y columnas, el agrietamiento de los techos y evitar su colapso.

Para restaurar las bóvedas del corredor oriente, se utilizaron procesos constructivos tradicionales; se retiró el relleno de las bóvedas y se colocó una losa de concreto reforzado soportada en los muros y arcos paralelos, sustituyendo a una losa similar usada en una intervención anterior de esta zona, por lo que se disminuyó la magnitud de la carga vertical.

Para la techumbre se implantó un sistema de armaduras de madera siguiendo la configuración estructural tradicional utilizada originalmente en la construcción de este tipo de techos y que aún es utilizada en la región. Se adicionaron tensores de acero entre cada armadura paralelos a la cuerda inferior. Esta solución se usó también para el rescate de la techumbre de la crujía sur, colindante con uno de los muros principales del templo.

Actualmente se está trabajando en la segunda etapa que consiste en la rehabilitación de la crujía norte, la cual tiene la arquería de mampostería muy destruida, se están restituyendo los arcos, bóvedas y columnas siguiendo el sistema y materiales originales de la construcción, y aplicando el sistema de tensores utilizado en el techo para la crujía oriente.

3. Estudio analítico del comportamiento de la iglesia de Santa Ana Maya, Michoacán, México

La nave principal de la iglesia fue construida a principios del siglo XIX con base en muros de adobe y piedra, con espesores que varían de 1.10 m a 1.30 m. Dado que se localiza en una zona sísmica, la iglesia fue construida con contrafuertes del mismo material, para dar estabilidad lateral al sistema. La planta tiene forma de cruz latina con un anexo en la parte derecha del acceso que se construyó en una época más reciente. El sistema de techo está formado por bóvedas; la bóveda del crucero tiene 11 metros

de diámetro aproximadamente. La cimentación existente consiste en fragmentos de roca con arcilla de 1.30 m de espesor, con profundidad variable de 1.15 m a 2.25 m con respecto al nivel de piso terminado.

El estudio es motivado por los daños que presenta la iglesia por los asentamientos diferenciales del terreno. Se observan agrietamientos en la torre, muros y bóvedas. Los asentamientos diferenciales se manifiestan también en la zona circundante a la iglesia. Para determinar las causas y posibles soluciones a los problemas que presenta la estructura, se realizaron las siguientes actividades:

1. Se llevó a cabo un levantamiento físico de la iglesia para determinar con precisión la geometría y los daños existentes.
2. Se realizaron sondeos geoelectricos para determinar las condiciones del subsuelo hasta una profundidad superior a los 30 m.
3. Se tomaron muestras superficiales en pozos a cielo abierto para determinar las propiedades mecánicas del suelo al nivel de la cimentación.
4. Se analizó la estructura mediante el programa ETABS para determinar las descargas sobre la cimentación, para la condición de cargas permanentes y cargas permanentes y sísmicas.
5. Con las descargas obtenidas se analizó la cimentación mediante una parrilla formada por zapatas corridas utilizando el programa SAP
6. Se elaboraron conclusiones a partir de los estudios de las etapas anteriores.

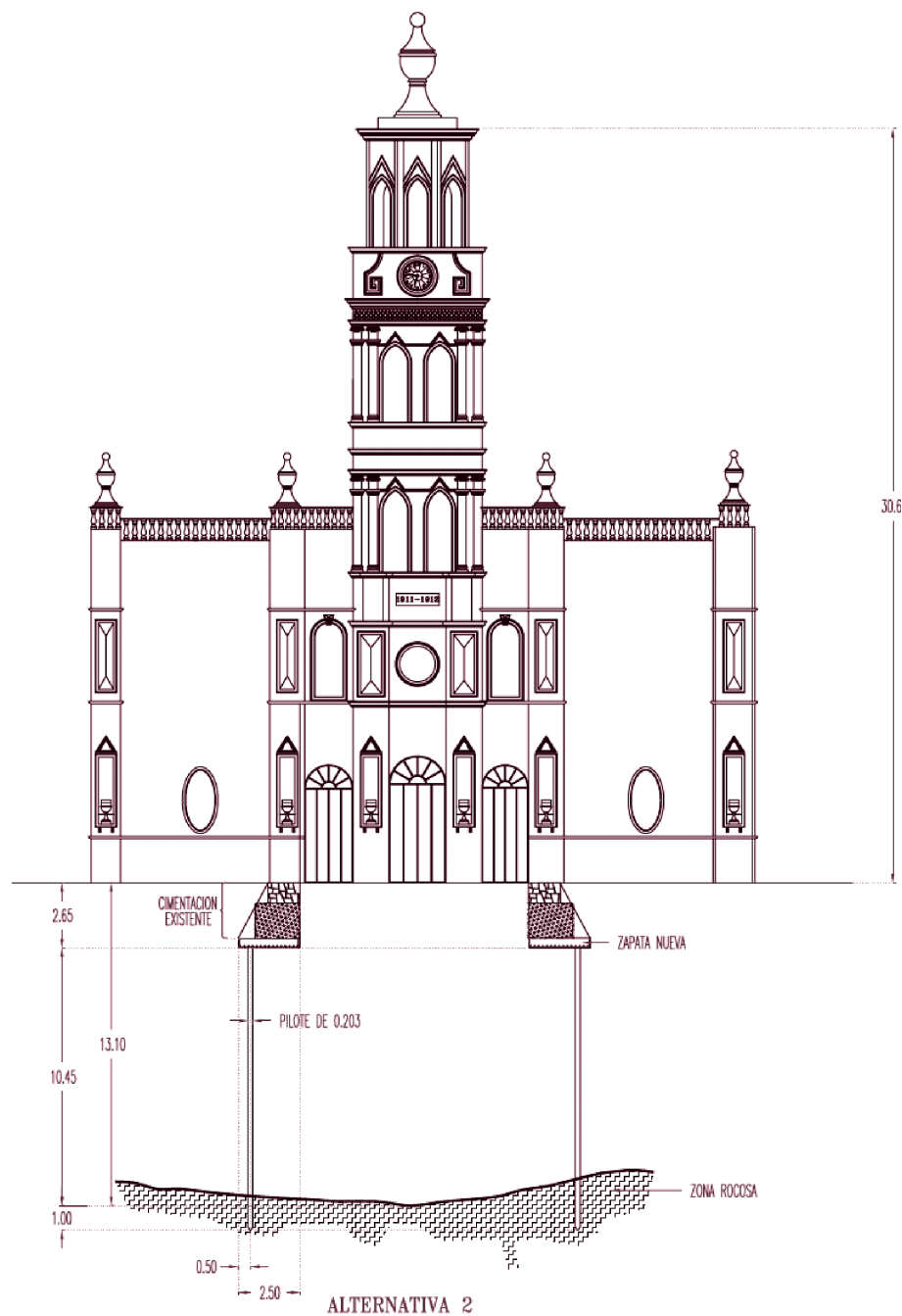
3.1 Levantamiento físico y de daños

Como resultado del levantamiento físico y de daños se identificaron las grietas, su longitud, ancho y ubicación. Cabe resaltar que las grietas principales se concentran en el extremo norte de la edificación, siendo las más importantes las que se observan en la torre. En la figura 3 se observa la fachada de la iglesia.

Con base en los trabajos de exploración de la cimentación se encontró que en el lado norte de la iglesia la profundidad de la cimentación es de 1.39 m con respecto al nivel del piso terminado, mientras que en el lado sur, la profundidad de los cimientos es de 2.25 m. La cimentación del lado norte es de mampostería con mortero y es de reciente construcción. La cimentación del lado sur es del mismo material, de mayor antigüedad y de menor dimensión.

3.2 Estratigrafía

Para determinar la estratigrafía y propiedades del suelo se empleó el método geoelectrico de resistividades con arreglo Schlumberger para abertura máxima de electrodos $AB/2 = 60$ m. Se utilizaron cuatro electrodos, dos de corriente o emisión, y dos de potencial, a varias profundidades. Se presentan relaciones resistividad contra profundidad de medición. A partir de los resultados se llega a las siguientes conclusiones: hasta 1.5 m de profundidad gravas y arenas superficiales; debajo de este estrato existe un depósito aluvial tipo arcilloso con espesor de 6 a 12 m;



Adición de pilotes apoyados directamente sobre el estrato resistente

subyaciendo al depósito aluvial se encontró un estrato de basalto con espesor de entre 10 m y 13 m, descansando sobre un estrato de tobas arenosas de espesor indefinido. La disposición estratigráfica es de transición abrupta, donde los espesores de las diferentes formaciones detectadas varían en espesor y disposición en distancias cortas. En uno de los sondeos se detectó un estrato de basalto debajo de la toba arenosa, producto de las erupciones volcánicas de las lomas que se ubican en el norte. Subyacente al estrato de toba se localiza otra roca ígnea extrusiva probablemente de basalto, se acuerdo con la información de cortes litológicos obtenidos en perforaciones de pozos de bombeo. Las propiedades del suelo de cimentación se identificaron a partir de dos pozos a cielo abierto de 2.5 m de profundidad, que sirvieron también para conocer las dimensiones de la cimentación. Se extrajeron muestras alteradas e inalteradas para su ensaye en el laboratorio, a partir de las cuales se obtuvieron los resultados siguientes:

- Capacidad de carga admisible al nivel de apoyo de la cimentación - 9.7 t/m²
- Asentamiento total probable para un esfuerzo de 10.7 t/m² - 5.0 cm
- Asentamiento máximo estimado - 2.5 cm

3.3 Modelo analítico de la iglesia

Para obtener las propiedades dinámicas de la iglesia, las descargas en la cimentación y estudiar el comportamiento de la iglesia se realizó un modelo con elementos finitos tipo Shell,

considerando el comportamiento tipo membrana y tipo placa. Los elementos finito son del tipo cuadrilátero con seis grados de libertad por nudo. Se procuró que la relación de aspecto de los elementos finitos fuera cercana a la unidad. Para las zonas de transición geométrica se modificaron estas relaciones, pero sin que las relaciones largo/ancho fueran mayores que cuatro. Se consideraron relaciones esfuerzo – deformación de los elementos finitos lineales, dado que el objetivo es identificar las formas modales, periodos, frecuencias y descargas sobre la cimentación. Los valores de los tres primeros periodos se indican en la tabla siguiente junto con la forma modal correspondiente.

No. de modo	Periodo (s)	Forma modal
1	3.19	Flexión transversal de torre y cúpula
2	1.53	Torsión de torre y cúpula
3	0.93	Flexión longitudinal de torre y cúpula

Como es de esperarse los primeros modos están asociados al movimiento de los elementos más flexibles (torre y cúpula). Los modos superiores, correspondientes al movimiento general de la iglesia son muy pequeños y alejados de la zona del espectro donde se supone que se concentra la mayor parte de la energía del sismo, para la zona sísmica considerada.

Posteriormente se revisó la capacidad sísmica de la estructura con base en la determinación de los esfuerzos en los distintos elementos de la iglesia que resultaron inferiores a los esfuerzos admisibles del material.

Las descargas en la cimentación se obtuvieron para la acción de cargas permanentes y para la combinación de cargas permanentes y sismo de diseño. A partir de los valores de las descargas se verificó la capacidad de la cimentación. Para ello se modeló la cimentación mediante una parrilla de zapatas corridas apoyadas sobre resortes elásticos para representar al suelo.

Los esfuerzos en el suelo resultaron mayores que los valores admisibles. El factor de seguridad calculado varía de 1.6 a 2.5 en diferentes zonas de la cimentación; los valores más bajos corresponden a la fachada norte de la iglesia. Es importante destacar que el factor de seguridad recomendado para la combinación de cargas permanentes y sismo para esta estructura de 3.0.

En las inmediaciones de la iglesia se observa que el pavimento y las casas muestran movimientos que han dado origen a agrietamientos importantes en dirección suroeste a noreste. Este problema también afecta a la estación de autobuses que se localiza próxima a la iglesia. Se considera que el abatimiento del nivel de aguas freáticas es responsable de dichos asentamientos. De acuerdo con los sondeos geoelectricos existen cambios abruptos en la topografía del estrato de basalto, lo que modifica los espesores del depósito aluvial entre ambos lados de la iglesia. Por otra parte, los niveles de esfuerzo en el terreno tan elevados favorecen también los asentamientos. Aunado a los aspectos anteriores, la asimetría en la distribución de esfuerzos que la iglesia transmite al suelo contribuye a los asentamientos diferenciales que dan origen a los agrietamientos observados.

La distribución de esfuerzos obtenidos en el modelo numérico coincide con la dirección y forma de las grietas existentes. Dado que los materiales que forman la iglesia se caracterizan por tener comportamiento frágil asociado a esfuerzos de tensión cuando se someten a distorsiones angulares pequeñas, es claro que los asentamientos diferenciales debidos a las causas descritas, dan origen a los agrietamientos de muros y techos observados en la iglesia.

3.4 Recomendaciones

Para reducir los asentamientos diferenciales se intentó, en primer lugar, reducir los esfuerzos transmitidos al terreno. Para ello se estudió la alternativa de incrementar el área de la superficie de apoyo, sin embargo, debido a las fuertes descargas que produce la estructura, a la baja capacidad de carga del terreno y a los asentamientos provocados por el abatimiento de los niveles piezométricos, esta opción no resulta económica y se prefiere acudir a una cimentación más profunda, mediante el uso de pilotes.

El uso de pilotes de fricción, o pilotes de punta permite reducir los esfuerzos al nivel de apoyo de la cimentación y transmite parte de la descarga a mayores profundidades. Dentro de esta alternativa se estudiaron tres posibles soluciones:

- a) Colocar pilotes de fricción de 20 cm de diámetro, con separación variable de acuerdo con la estratigrafía y descargas de la iglesia, hincados hasta una profundidad de 8 m.
- b) Introducir los pilotes hasta encontrar la roca basáltica (zona dura) lo que originaría que los pilotes trabajen de punta (figura 3). Esto es económicamente posible dado que la profundidad de la roca basáltica es un poco mayor que 12 m. Si se adopta esta solución, la iglesia puede emerger con respecto a las construcciones circundantes, si los asentamientos de la región siguen produciéndose. Esta situación requiere de adaptaciones a futuro, que pueden consistir en modificaciones a las fachadas o adecuaciones a los pilotes (pilotes de control)
- c) Hincar pilotes de fricción y pilotes de punta, en una solución mixta, con el propósito de evitar emersiones y asentamientos de relevancia en el futuro.

Antes de decidirse por alguna de las alternativas anteriores, es necesario efectuar mediciones periódicas del nivel de aguas freáticas, para estimar las pérdidas piezométricas del lugar en alguno de los pozos de bombeo de la zona. Asimismo, deberán determinarse las propiedades mecánicas de la roca basáltica mediante la realización de sondeos profundos.

Finalmente, de acuerdo con los estudios realizados, se estableció un procedimiento para la reparación de los elementos dañados.

Bibliografía

Alcocer S.M., Aguilar G., Flores L., Durán L., López-Bátiz O., Pacheco M.A., Uribe C.M: y Mendoza M., (1999):. “El sismo de Tehuacan del 15 de junio de 1999”, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Informe IEG/01/99, México.

Jara, J.M., Rojas, R. y Olmos, B.A., (2005):. “Comportamiento de edificaciones durante el temblor de Colima del 21 de enero de 2003”, Ciencia Nicolaita, No. 41, pp. 209-224, Morelia, Michoacán, agosto, 2005.

Jara M., (1999):, “Informe sobre el sismo de Tehuacan del 15 de junio de 1999”, Rreporte interno de la Facultad de Ingeniería Civil,

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

Meli R., (2003):. “Patologías en edificios históricos dañados por sismo”, VII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y IX Congreso de Control de Calidad en la Construcción, Vol 1 1, Control de Calidad, p. 101-114, ISBN 968-464-133-8, Mérida Yucatán, México.

Meli R., (1998): “Ingeniería eEstructural de los Eedificios Hhistóricos”, Fundación ICA, México.

Autores

Manuel Jara-Díaz,. Pprofesor linvestigador en la Universidad Michoacana,. Ddoctor por la Universidad Politécnica de Cataluña. , hHa impartido cursos y conferencias en varios países, . Aautor de artículos publicados en revistas, congresos y seminarios.

José Manuel Jara-Guerrero,. Pprofesor linvestigador en la Universidad Michoacana, . Ddoctor por la Universidad Nacional Autónoma de México,. hHa impartido conferencias en México y el extranjero,. Aautor de artículos publicados en revistas, congresos y seminarios.

Jorge Alfredo Aguilar Carboney,. Pprofesor linvestigador en la Universidad Autónoma de Chiapas,. Mmaestro en lingeniería por la Universidad de Texas en Austin, EEUU., Ccon amplia experiencia en la rehabilitación de edificios históricos y la investigación.

Humberto Salazar Amorim Varum,. Pprofesor ilvestigador en la Universidad de Aveiro en Portugal,. Ddoctor en Ingeniería Civil de la Universidad de Aveiro,. hHa impartido cursos y conferencias en varios países Eeuropeos y de América,. Aautor de artículos publicados en revistas, congresos y seminarios.